

**Ocena osiągnięcia naukowego pt. „ALICE jako laboratorium do badania silnie oddziałujących systemów za pomocą korelacji cząstek”  
oraz  
ocena istotnej aktywności naukowej dr. inż. Łukasza Kamila Graczykowskiego  
w związku z wszczęciem postępowania habilitacyjnego kandydata w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne**

### **Uwagi wstępne**

Zgodnie z wymaganiami określonymi w art. 219 ust.1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668) ocenie podlega w tym przypadku osiągnięcie naukowe jakim jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych zatytułowany „ALICE jako laboratorium do badania silnie oddziałujących systemów za pomocą korelacji cząstek”, przy czym należy również ocenić, czy przedstawione osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowi znaczący wkład habilitanta w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Ponadto oceniana jest aktywność naukowa habilitanta, jego dorobek dydaktyczny i popularyzatorski oraz poziom jego współpracy naukowej, w tym międzynarodowej.

Recenzowany materiał zawiera wniosek, kopię dyplomu doktorskiego, autoreferat, wykaz osiągnięć naukowych. Dodatkowo w materiale znajdują się teksty publikacji wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego, oświadczenia współautorów publikacji oraz zaświadczenie o pracy kandydata w eksperymencie ALICE. Poniżej odniosę się do istotnych składników tego materiału i zakończę recenzję konkluzją.

### **Sylwetka kandydata**

Dr inż. Łukasz Kamil Graczykowski jest fizykiem doświadczalnym, który od początku swojej kariery naukowej prowadzi badania naukowe na Politechnice Warszawskiej (PW) w ramach dużej współpracy naukowej eksperymentu ALICE działającego przy zderzaczu Large Hadron Collider (LHC) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN. Studia inżynierskie i magisterskie odbył na Wydziale Fizyki PW. W 2011 roku ukończył z wyróżnieniem studia magisterskie oraz pod kierunkiem prof. dr. hab. Adama Kisiela przygotował pracę magisterską zatytułowaną „Influence of jet-induced global event structures on the pion femtoscopic correlations measured in proton-proton collisions registered by the ALICE experiment”. W 2015 roku obronił na Wydziale Fizyki PW pracę doktorską pod tytułem „Femtoscopic analysis of hadron-hadron collisions in ultrarelativistic collisions of protons and heavy-ions registered by ALICE at the LHC”, którą przygotował również pod kierunkiem prof. dr. hab. Adama Kisiela. Już od czasu studiów magisterskich odbywał częste staże naukowe

w ośrodku CERN, jako naukowiec wizytujący przez 2-4 miesiące każdego roku. Jak sam habilitant podaje w autoreferacie czas spędzony w CERN przed obroną pracy doktorskiej to 17 miesięcy oraz 20 miesięcy czasie po doktoracie. Właśnie w tym okresie habilitant prowadził badania, które zostały przedstawione jako osiągnięcie naukowe opisane w cyklu artykułów. Oprócz prowadzenia analiz fizycznych habilitant pełnił ważne funkcje organizacyjne w eksperymencie dotyczące istotnych dla współpracy ALICE aktywności związanych ze zbieraniem danych oraz koordynacji tematycznych grup analiz (Physics Analysis Group - PAG). W szczególności koordynował pracę dwóch grup: Femtoscopy PAG i Correlations PAG. Obecnie pełni rolę szefa zespołu naukowców z PW w ALICE oraz jest członkiem Rady Kolaboracji w eksperymencie ALICE.

Podsumowując sylwetkę kandydata stwierdzam, że w okresie po uzyskaniu stopnia doktora habilitant prowadził bardzo aktywną działalność naukową rozwijając kontakty oraz współpracę z wieloma grupami z różnych instytucji naukowych oraz pełniąc rolę w dużej współpracy eksperymentu ALICE w CERN.

### **Ocena cyklu publikacji stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego**

Podstawą do przyznania stopnia doktora habilitowanego jest osiągnięcie naukowe, cykl jedenastu artykułów pod zbiorczym tytułem „ALICE jako laboratorium do badania silnie oddziałujących systemów za pomocą korelacji cząstek”.

Pięć artykułów, oznaczonych w autoreferacie jako [H1-H5], to wieloautorskie publikacje eksperymentu ALICE a artykuły [H6-H11] są sygnowane przez co najwyżej czterech autorów.

Motywy przewodnim w działalności naukowej dr. inż. Łukasza Graczykowskiego jest fizyka doświadczalna oddziaływań protonów oraz ciężkich jonów w zderzeniach przy wysokich energiach. Podstawą teoretyczną tej dziedziny fizyki jest teoria fizyczna opisująca oddziaływania kwarków, gluonów i leptonów – Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych.

Praca [H1] wchodząca w skład osiągnięcia naukowego habilitanta opisuje pomiar czasowo-przestrzennych rozmiarów źródeł, z których emitowane są cząstki podczas relatywistycznych zderzeń jąder ołowiu. Do tego celu zastosowano technikę opartą na pomiarze korelacji femtoskopowych zachodzących w parach hadronów, dla różnych typów cząstek. Prace [H2-H4] obejmują badania oddziaływania hadronów w stanie końcowym poprzez pomiar korelacji femtoskopowych występujących w parach hadron-hadron. Ponadto, proces hadronizacji badano za pomocą korelacji kątowych między powstałymi w zderzeniu cząstkami, co opisano w pracach [H5-H7]. Poza badaniami związanymi ściśle z fizyką, w ramach współpracy z zespołem informatyków z PW habilitant przyczynił się do rozwoju technicznych aspektów eksperymentu ALICE, pracując nad ulepszeniami algorytmów identyfikacji cząstek (Particle Identification – PID) w oparciu o techniki uczenia maszynowego co opisano w pracach [H8-H9]. Habilitant brał także udział w pracach związanych z wizualizacją zderzeń w eksperymencie ALICE [H10]. Jest również jedną z osób odpowiedzialnych w ALICE za działania popularyzatorskie w zakresie rozwoju oprogramowania ALICE MasterClass [H11], jako jeden z głównych organizatorów lokalnych sesji tego wydarzenia.

W pracy [H1] opublikowanej w Physics Letters B przedstawione zostały wyniki analizy zderzeń jonów ołowiu przy energii zderzenia 2.76 TeV na parę nukleonów. Celem tej analizy był pomiar rozmiaru i czasu życia układu utworzonego w zderzeniu. Dane ALICE dla identycznych pionów oraz par naładowanych i neutralnych kaonów są porównane z obliczeniami z modelu hydrodynamicznego w (3+1) wymiarach sprzężonego z modelem statystycznej hadronizacji (THERMINATOR 2), jak również do dwóch wariantów (z i bez oddziaływań hadronowych w fazie gazu hadronowego) obliczeń z modelu HKM dla 5% najbardziej centralnych zderzeń. Zaobserwowano wyraźne odchylenie między obliczeniami modelu HKM bez fazy ponownego rozpraszania a danymi dla identycznych kaonów. Pomiaru są natomiast dobrze odtwarzane przez pełne obliczenia modelu, które obejmują efekt ponownego rozpraszania hadronów w późnych etapach ewolucji systemu, pokazując w ten sposób istotne znaczenie fazy hadronowej w zderzeniach przy energiach LHC. Wyjaśnienie różnicy między czasem emisji kaonów i pionów zawarte w pracy [H1] opiera się na zaobserwowanej niezerowej asymetrii emisji, która jest konsekwencją kilku efektów: kolektywnej ekspansji układu, obecności krótkotrwałych rezonansów rozpadających się na rozważane cząstki oraz przepływu radialnego tych rezonansów.

Prace [H2-H3] opublikowane odpowiednio w Physics Letters B i Physical Review Letters dotyczą femtoskopowych pomiarów parametrów oddziaływania kaon-nukleon w zderzeniach proton-proton, proton-ołów i ołów-ołów w obecności kanałów sprzężonych istniejących w oddziaływaniach, gdy pary cząstek o niewielkiej masie mają te same niektóre liczby kwantowe (ładunek elektryczny, dziwność). Zaobserwowano wzrost rozmiaru źródła dla zmierzonych funkcji korelacji w zderzeniach p-p [H3], p-Pb oraz Pb-Pb [H2]. Pokazano, że kształt mierzonej funkcji korelacji różni się znacznie między zderzeniami. W zderzeniach p-p obserwowany jest specyficzny pik przy pędzie względnym 58 MeV/c, który nie występuje dla dużych systemów, takich jak Pb-Pb. Wraz ze wzrostem rozmiaru źródła wzmocnienie przy niskich pędach spowodowane wkładem od kanałów sprzężonych również zachowuje ten sam trend, stając się coraz mniej wyraźne.

W pracy [H4] opisano badanie femtoskopowe parametrów oddziaływania silnego dla par barion-antybarion (proton-antyproton, (anty)proton-antylambda, lambda-antylambda). Badania korelacji dwucząstkowych par barion-antybarion w celu zbadania oddziaływania silnego w tym sektorze o niezerowej dziwności są możliwe w zderzeniach p-p i Pb-Pb na LHC, gdzie wytwarzana jest podobna ilość barionów i antybarionów. Wykonano jednoczesne dopasowanie formuły matematycznej do wszystkich funkcji korelacji w celu wyodrębnienia parametrów rozpraszania oddziaływania silnego. Otrzymano parametry rozpraszania uśrednione spinowo, tj. części rzeczywistą i urojoną długości rozpraszania oraz rzeczywistą część efektywnego zasięgu oddziaływania. Wyniki nie pozwalają wykluczyć obecności stanu związanego w kanałach barion-antybarion.

W pracy [H5] opisano pomiar (anty)korelacji dwóch barionów jako funkcję różnicy kątów azymutalnych i różnicy pseudopospieszności w zderzeniach proton-proton o energii 7 TeV w układzie środka masy. Podobny efekt (antykorelacji) zaobserwowano dla par antyproton-antyproton, proton-lambda i antyproton-antylambda, a także lambda-lambda antylambda-antylambda. Pochodzenie efektu antykorelacji, który utrzymuje się przy tak wysokiej energii zderzeń, pozostaje nieznane i stanowi wyzwanie dla obecnych modeli hadronizacji.

W ocenie wkładu habilitanta do prac [H1-H5] opieram się na oświadczeniu dr. Luciano Musy, rzecznika eksperymentu ALICE, potwierdzającym istotny udział Łukasza Graczykowskiego

w prowadzonych pracach doświadczalnych, analizie wyników pomiarów, wyciąganiu wniosków fizycznych i redakcji publikacji. Dr Musa stwierdza, że dr Łukasz Graczykowski należał do niewielkiej grupy autorów (Paper Committee) przygotowujących prace [H1, H2, H4, H5], którzy zostali wskazani przez współpracę ALICE na podstawie ich znacznych oryginalnych wkładów do specyficznych analiz opisanych w pracach. Ponadto dr Musa pisze, że habilitant należał do niewielkiej grupy niezależnych, wewnętrznych recenzentów (Internal Review Committee) pracy H3, którzy zostali wybrani przez kolaborację ze względu na ich ekspercką znajomość tematyki opisanej w pracy.

Dwie kolejne prace [H6-H7] (H6 napisana wraz z dwojgiem współautorów a H7 przygotowana z jedną współautorką – Małgorzatą Janik) powstały poza współpracą ALICE i dotyczą badań z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo. Praca [H6] powstała jako rezultat wystąpienia na konferencji Quark Matter 2015 przedstawia wyniki badań z symulowanymi zderzeniami, w których energia i pęd są zachowane, brakuje natomiast wpływu od innych mechanizmów fizycznych. Do tego celu opracowany został model Monte Carlo który pozwolił na zbadanie wpływu praw zachowania na funkcje korelacji kątowych. Ten prosty opis pozwolił jakościowo odtworzyć struktury obserwowane dla korelacji barion-barion w danych ALICE. Habilitant wraz z dr Małgorzatą Janik zaproponował i zbadał procedurę bazującą na symulacjach z modelu PYTHIA 8 (połączoną z formalizmem Lednický'ego i Lyuboshitza do obliczania statystyk kwantowych (QS) oraz efektów oddziaływania w stanie końcowym (FSI)), która wykorzystuje zmierzone korelacje femtoskopowe do określenia wpływu efektów QS i FSI w korelacjach kątowych. Wyniki tych badań zostały opublikowane w pracy [H7].

Prace [H8-H9] (przygotowane w zespołach, odpowiednio trzy i czteroosobowym) dotyczą badań nad poprawą metody identyfikacji cząstek w eksperymencie ALICE za pomocą technik uczenia maszynowego. Głównym zadaniem procedury identyfikacji cząstek jest dostarczenie próbek o wysokiej czystości cząstek danego typu wymaganych przez fizyka przeprowadzającego określoną analizę. Habilitant podjął kilka prób wprowadzenia strategii PID opartych na uczeniu maszynowym dla danych ALICE zebranych podczas LHC Run 2. W pracy [H8] zaproponowano metodę opartą na algorytmie lasu losowego (Random Forest) i pokazano wyniki przykładowej selekcji kaonów. Wykorzystano do tego metodę generowania drzewa na podstawie indeksu Gini, który definiuje się jako prawdopodobieństwo błędnej klasyfikacji przy użyciu tylko danego atrybutu. Przeprowadzone badania wskazują, że dzięki uwzględnieniu dodatkowych atrybutów zrekonstruowanej cząstki metoda PID oparta na uczeniu maszynowym zapewnia znacznie wyższą wydajność i czystość wybranych cząstek niż standardowe metody selekcji.

Praca [H10] przygotowana w trzyosobowym zespole, dotyczy opisu nowego narzędzia do wizualizacji zderzeń (Event Display), które działa w eksperymencie ALICE podczas zbierania danych. Opisany w pracy [H10] program w przeciwieństwie do poprzednio używanego korzysta w czasie rzeczywistym ze szczegółowej mapy pola magnetycznego generowanego w eksperymencie. Program służy do wizualizacji 3D zderzeń cząstek oraz wyświetlania mapy pola magnetycznego. Testy wykonane przez autorów pracy pokazują, że ich narzędzie Event Display pozwala na uzyskanie dokładności odtworzenia śladów cząstek w detektorze przewyższającą o dwa rzędy wielkości dokładność uzyskiwaną przez obecnie stosowane w eksperymencie narzędzie używające modelu jednolitego pola magnetycznego.

Praca [H11] będąca spisaniem wykładem, który habilitant wygłosił na prestiżowej konferencji ICHEP 2019 w Adelajdzie związana jest z jego działalnością edukacyjną oraz popularyzacją

nauki. [H11] zawiera opis prac nad modyfikacją oprogramowania ALICE MasterClass generującego środowisko, w którym osoby nie związane bezpośrednio z eksperymentem, zwykle uczniowie szkół średnich, mogą wykonywać analizy danych zebranych w trakcie eksperymentu. W ALICE MasterClass istnieją dwa w pełni funkcjonalne ćwiczenia: MasterClass mający na celu badanie wzmocnienia dziwności oraz przygotowane później na jego podstawie ćwiczenie do wyznaczania czynnika modyfikacji jądrowej. Nowy framework, opisany w [H11], w którym zintegrowane są wszystkie funkcjonalności ALICE MasterClass począwszy od roku 2020 jest używany w harmonogramie International MasterClasses – Hands-On Particle Physics.

Podsumowując ocenę stwierdzam, że istotna rola habilitanta w przedstawionych cyklu artykułów [H1-H11] nie budzi wątpliwości a wyniki przedstawione w tych pracach są wartościowe i wnoszą wkład w rozwój eksperymentalnej fizyki wysokich energii.

### **Ocena pozostałej aktywności naukowej**

Parametry naukometryczne są zwykle dość wysokie w przypadku udziału w dużych współpracach międzynarodowych i z tego powodu mają pewne naturalne ograniczenie przy ocenie dorobku naukowego. Niemniej, należy zauważyć, że te parametry w przypadku habilitanta są wysokie w porównaniu do typowych na tym etapie kariery w fizyce zderzeń relatywistycznych jonów.

W momencie składania wniosku habilitant był współautorem 372 prac naukowych, w większości (354) były to publikacje wieloautorskie współpracy ALICE. Prace były publikowane w wiodących czasopismach w obszarze fizyki wysokich energii. Do oceny aktywności naukowej niezwiązanej bezpośrednio z przedstawionym cyklem jedenastu publikacji należy wziąć pod uwagę dodatkowe informacje: prace ze znaczącym wkładem habilitanta, które wymienia w swoim oświadczeniu dr Luciano Musa, noty publiczne i wewnętrzne eksperymentu ALICE, wystąpienia i noty konferencyjne. Prace te świadczą o aktywności dr. Graczykowskiego w obszarze eksperymentalnej fizyki zderzeń relatywistycznych jonów ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów korelacji pomiędzy cząstkami powstałymi w zderzeniach jonów za pomocą technik femtoskopowych i technikach bazujących na korelacjach kątowych. Widoczny jest także udział habilitanta w tworzeniu nowego systemu akwizycji danych w eksperymencie ALICE. Habilitant pełnił również funkcje organizacyjne wymagające odpowiednio wysokiej wiedzy w danej tematyce. Koordynował pracę grup Femtoscopy PAG i Correlations PAG w ALICE. Obecnie pełni rolę szefa zespołu naukowców z PW w ALICE oraz jest członkiem Rady Kolaboracji w eksperymencie ALICE. Poza aktywnością w ramach ALICE dr Graczykowski bierze udział od 2021 roku w pracach eksperymentu AEGIS zlokalizowanego przy deceleratorze antyprotonów w CERN.

Habilitant wielokrotnie odbywał staże naukowe w ośrodku CERN (w sumie około 3 lat), najpierw jako student wizytujący, a później naukowiec wizytujący CERN (Associated Member of the Personnel – Corresponding Associate). Osiągnięcia w późniejszym okresie świadczą o systematycznym rozwoju dr. inż. Łukasza Graczykowskiego. Habilitant wygłosił dziewięć zaproszonych i dwadzieścia dwa zgłoszone referaty konferencyjne, z czego większość (ponad dwadzieścia) w imieniu współpracy ALICE, co świadczy o uznaniu habilitanta jako rozpoznawalnego eksperta z zakresu prowadzonych badań. Habilitant pracował również w komitetach organizacyjnych kilku międzynarodowych konferencji naukowych.

Dr Graczykowski ma duże doświadczenie w prowadzeniu i w udziale w projektach badawczych. Habilitant był wykonawcą w sześciu grantach a kierował/kieruje czterema projektami (NCN PRELUDIUM – przed obroną pracy doktorskiej, PW Inicjatywa Doskonałości, MEiN, NCN SONATA).

Działalność dydaktyczna habilitanta jest znacząca. Po uzyskaniu stopnia doktora pełnił/pełni rolę promotora pomocniczego w jednym zakończonym i jednym trwającym doktoracie na PW. Był promotorem dwunastu prac magisterskich i inżynierskich realizowanych na PW. Był również opiekunem dwóch studentów w trakcie ich letnich staży naukowych w ramach programu CERN Summer Students. Począwszy od roku 2011 habilitant prowadził na PW zajęcia dydaktyczne w ramach sześciu przedmiotów realizowanych na studiach I stopnia.

Poza działalnością organizacyjną w ramach eksperymentu ALICE, dr Graczykowski zasiada w Radzie Wydziału Fizyki PW oraz Radzie Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne w Politechnice Warszawskiej. W 2013 roku przewodniczył Wydziałowej Radzie Doktorantów Wydziału Fizyki PW.

Habilitant od 2013 roku zajmuje się popularyzacją nauki (udział w programie International MasterClasses, liczne wykłady na temat badań prowadzonych w CERN zarówno dla uczniów liceów jak i słuchaczy Uniwersytetu Trzeciego Wieku PW, koordynacja działań na PW w ramach wydarzenia 30 lat PL@CERN).

Uważam, że dorobek naukowy dr. inż. Łukasza Graczykowskiego spełnia wymogi ustawowe dotyczące ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego.

### **Wniosek końcowy**

Dr inż. Łukasz Kamil Graczykowski jest aktywnym fizykiem – eksperymentatorem, który osiągnął dojrzałość do prowadzenia samodzielnej działalności badawczej, organizacyjnej i dydaktycznej. Przedstawiony cykl artykułów naukowych zawierający prace zarówno eksperymentalne jak i publikacje interdyscyplinarne z propozycją znaczących modyfikacji podnoszących jakość prowadzenia badań w ramach dużych projektów naukowych świadczą o dużej aktywności badawczej i wszechstronności habilitanta. Uważam, że jego dorobek naukowy oraz przedstawiony jako główne osiągnięcie cykl jedenastu artykułów spełniają wymogi ustawy do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Wnioskuje o dopuszczenie dr. inż. Łukasza Kamila Graczykowskiego do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Maciej Rybczyński  
/– podpisany cyfrowo/